

文章编号:1000-0550(2014)06-1026-09

湖泊三角洲沉积露头精细解剖^① ——以鄂尔多斯盆地裴庄剖面为例

赵俊峰¹ 屈红军¹ 林晋炎¹ 刘祥² 杨扬¹ 林川¹

(1.西北大学大陆动力学国家重点实验室/西北大学地质学系 西安 710069;2.中国石油华北油田分公司 河北任丘 062552)

摘要 客观、精细刻画储集体内部结构已成为油气精细勘探开发的必然要求。沉积露头为地下储层地质模型的建立发挥着不可替代的作用。以鄂尔多斯盆地裴庄剖面延安组为例,采用沉积学和构型要素的分析方法,详细剖析了湖泊三角洲水下沉积的内部结构。研究表明,裴庄剖面发育9种岩相类型,3类岩相组合,进而可识别出前三三角洲、席状砂、远砂坝、河口坝、水下分流河道、水下分流间湾等6类沉积结构单元。在水下分流河道中可识别出5级界面。研究认为,浅水三角洲前缘的砂体并非仅有水下分流河道,还有河口坝、远砂坝以及席状砂等多种类型。裴庄剖面总体为一套向上变粗的沉积序列,三角洲前缘的前积结构表现不明显。加强露头研究并开展针对性的物理模拟实验,是解答浅水三角洲研究争论的重要途径。

关键词 露头 岩相类型 沉积构型 沉积界面 浅水三角洲 延安组 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 赵俊峰 男 1975年出生 博士 副教授 沉积学与盆地分析 E-mail: zjf@nwu.edu.cn

中图分类号 TE121.3 **文献标识码** A

湖泊三角洲处于河流入湖的河口部位,特殊的沉积位置和岩相组合使其成为油气聚集的有利场所。对于以陆相盆地为勘探主体的我国,其重要性不言而喻。建立详细的储层地质模型,刻画并预测储集体内部结构,已成为精细勘探开发的必然要求。露头剖面能够从二维或三维的角度,较连续、完整地揭露沉积实体包含的丰富信息,有效弥补钻井和地震等地下勘探资料的不足,因而成为储层沉积学关注的重点之一^[1-4]。以往国外对陆相三角洲的露头研究较少^[5-6];国内针对不同类型的湖泊三角洲开展了大量的探索,但以井下资料为主,基于露头的研究较少。近年来对浅水三角洲的讨论持续不断^[7-9],正在将湖泊三角洲的研究引向深入。

鄂尔多斯盆地是发育于中生代的大型克拉通内拗陷型湖盆。该盆地虽地表黄土广布,沟壑纵横,然而地下地层产状却极为简单,主体部分陕北斜坡呈微向西倾的单斜(图1)。沿公路、现代河流出露大量典型陆相沉积剖面。前人针对砂体构型、储层物性与地质建模、层序与沉积体系演化等,对该盆地部分露头开展过不同程度的研究^[10-16]。本文选择前人研究薄弱,而地层出露良好,沉积现象典型的延安裴庄剖面,作为重点解剖对象,以期为湖泊三角洲露头研究增添

新的素材与认识。剖面位于延安市裴庄以西的303省道157~159 km处,中心点坐标36°37'43.5" N, 109°22'16.1" E, H:1 000 m。剖面主体呈东西走向,地层产状平缓,层位属中侏罗统延安组延6油层组。该剖面中上部出露的巨厚层砂岩为延安组内部一套重要的区域对比标志层,俗称裴庄砂岩。采用沉积学和构型要素分析的思路与方法^[1,17],在详细的露头二维结构面板描述、沉积柱状测制,相标志拾取、古水流数据统计等基础上,识别了岩相类型、构型要素、界面等级,在此基础上总结了裴庄剖面的垂向序列特征并讨论了相关问题。

1 岩相类型及组合

岩相指在特定的水动力条件或能量下形成的岩石单元,主要由岩石类型与沉积构造表征^[1]。研究区内共识别出9种主要的岩相类型,按其在剖面上的共生关系,由下而上可划分为:暗色泥岩相组合(LA1)、薄—中层状泥岩粉砂岩相组合(LA2)以及中—巨厚层状砂岩相组合(LA3)3类岩相组合(图2~5)。9种主要岩相特征如下:

(1) 水平层理泥岩相(Mh):发育于剖面底部,横向分布稳定,剖面东侧出露好,厚度0.5~1.0 m,岩性

^①国家自然科学基金(批准号:41330315、J1030517)与西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项经费项目(编号:BJ12146、BJ081334)联合资助

收稿日期:2013-12-19;收修改稿日期:2014-03-04

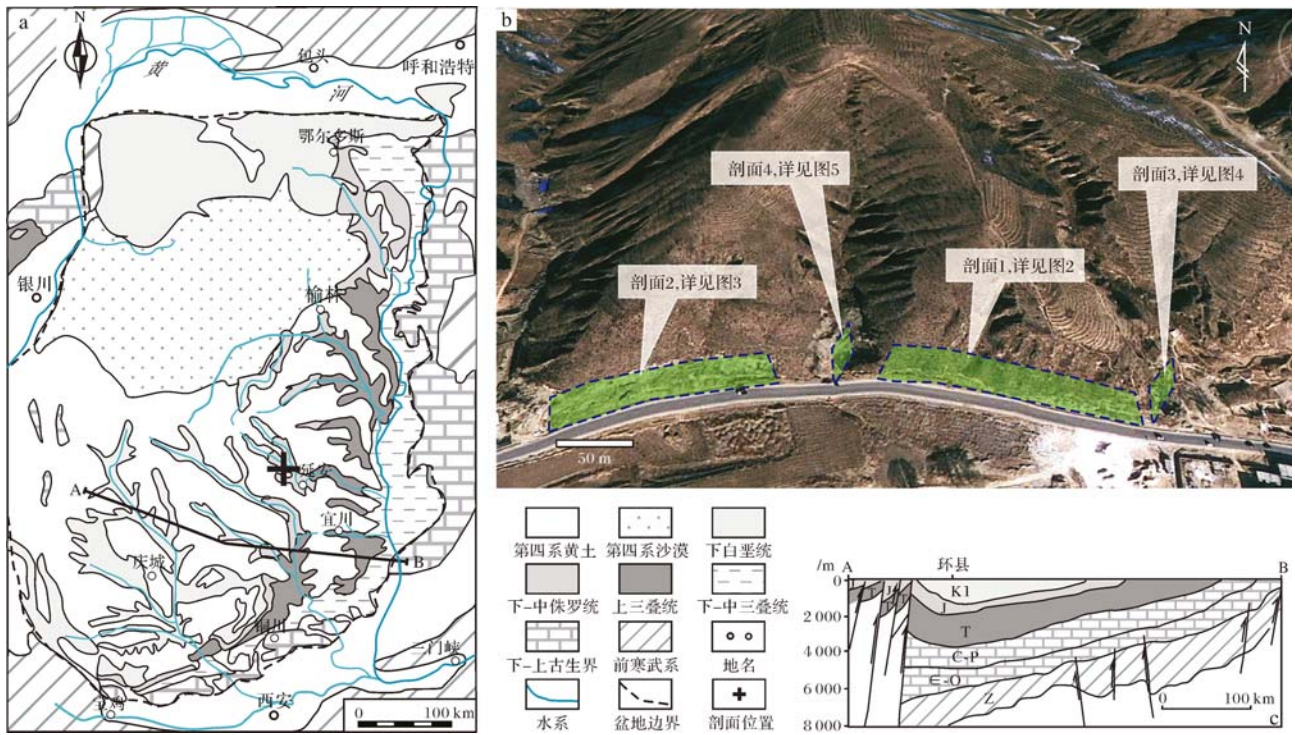


图1 研究区位置图

a.鄂尔多斯盆地地质简图;b.延安裴庄剖面鸟瞰图;c.鄂尔多斯盆地南部东西向剖面示意图

Fig.1 Map showing the location of surveyed area

a. simplified geological map of the Ordos Basin; b. birds' -eye view of the Peizhuang section, Yan'an area;

c. geological profile of the southern Ordos Basin along west-east orientation

为灰黑色、深灰绿色泥岩,局部见细小植物碎屑,下部夹薄层页岩。反映细粒悬浮物在静水环境、平坦地形条件下的缓慢沉降作用(图 6a,b)。

(2) 块状泥岩相(Mm):发育于剖面下部,夹于灰黑色、深灰绿色水平层理泥岩相中,以灰绿色为主,反映静水环境下的缓慢堆积作用。

(3) 波状层理粉砂岩相(Fw):发育于灰绿色水平层理泥岩相之上,由深、浅灰绿色的粉砂岩、泥岩纹层叠加组成,呈微波状起伏,横向可演变为透镜状、压扁层理,反映沉积水体介质处于活动与停滞的交替状态。该类型岩相厚度 15 cm 左右,横向分布不稳定(图 6d)。

(4) 砂纹层理粉砂岩相(Fr):发育于露头的中下部,位于波状层理粉砂岩相之上或同层位,为浅灰绿色粉砂岩,内部纹层呈对称的缓波状、人字形排列,具有浪成砂纹层理的特点,单组纹层起伏高度 1~3 cm,总厚度约 0.5~0.7 m,由水下沙波迁移所形成,是湖内波浪震荡作用的产物(图 6c,g)。

(5) 同生变形构造粉砂岩相(Fd):发育于砂纹层理粉砂岩相之上或与之同层位,岩性为浅灰绿色粉

砂岩。露头可见两类变形构造,一类是由砂纹层理粉砂岩相演变而来的似火焰状小型泄水构造,在西侧剖面的东部可见(图 3、图 6h);另一类是原生层理构造发生扭曲变形形成的大型包卷层理,厚度 0.5~0.8 m 左右,横向延伸 100 余米,发育于东侧剖面(图 2、图 7a,b)。同生变形构造的广泛发育,反映了地形不稳条件下的快速堆积作用,是水下沉积的典型特征(图 7)。

(6) 槽状交错层理砂岩相(St):该类型岩相可见小、中及大型槽状交错层理,小型槽状交错层理出现在剖面下部,中、大型层理则出现在上部,岩性主要为灰绿色细砂岩。该岩相类型反映牵引流沉积的特征,为不同规模水下沙丘迁移的结果(图 6e、图 7a)。

(7) 板状交错层理砂岩相(Sp):在东、西剖面均可见,西侧剖面层系规模大,厚度可达 1~1.5 m,东侧剖面层理规模较小,厚度为 0.4~0.6 m。岩性为灰绿色细砂岩,出现在上部岩相组合的中部。板状交错层理为水下沙浪迁移的结果,前积纹层倾角 4°~17°,揭示古水流向西(图 7)。

(8) 平行层理砂岩相(Sh):发育于上部岩相组

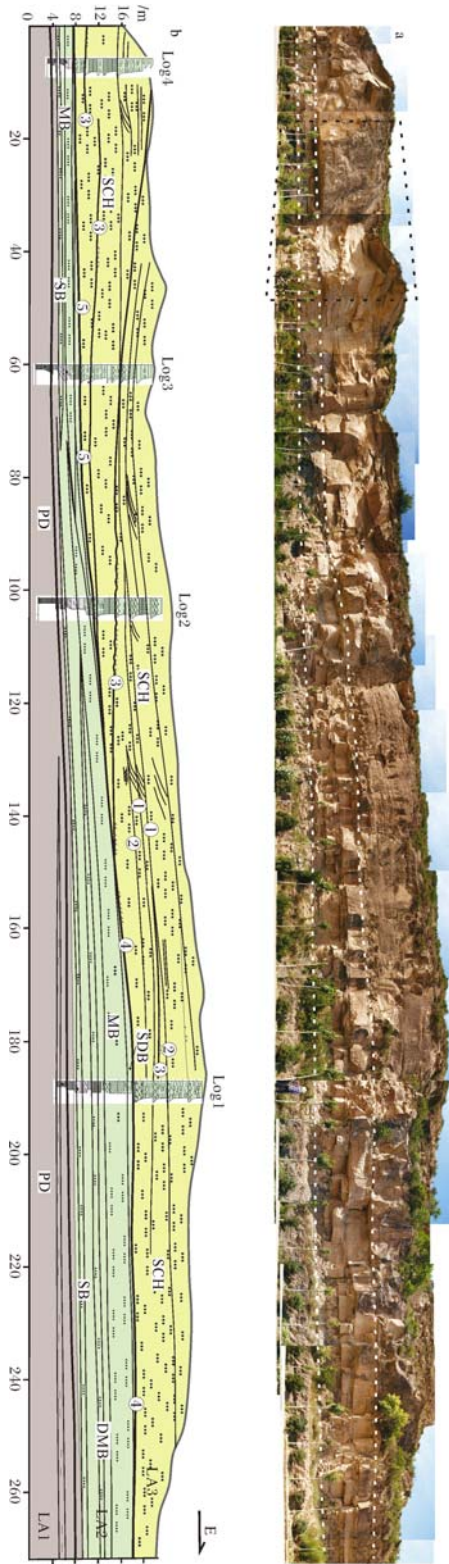


图2 裴庄剖面东段(剖面1)沉积相分析图
(a.照片镶嵌;b.内部结构解释图)

Fig.2 Sedimentary facies analysis of the east part of Peizhuang section(section 1) (a. photomosaic map; b. internal architecture interpretation)

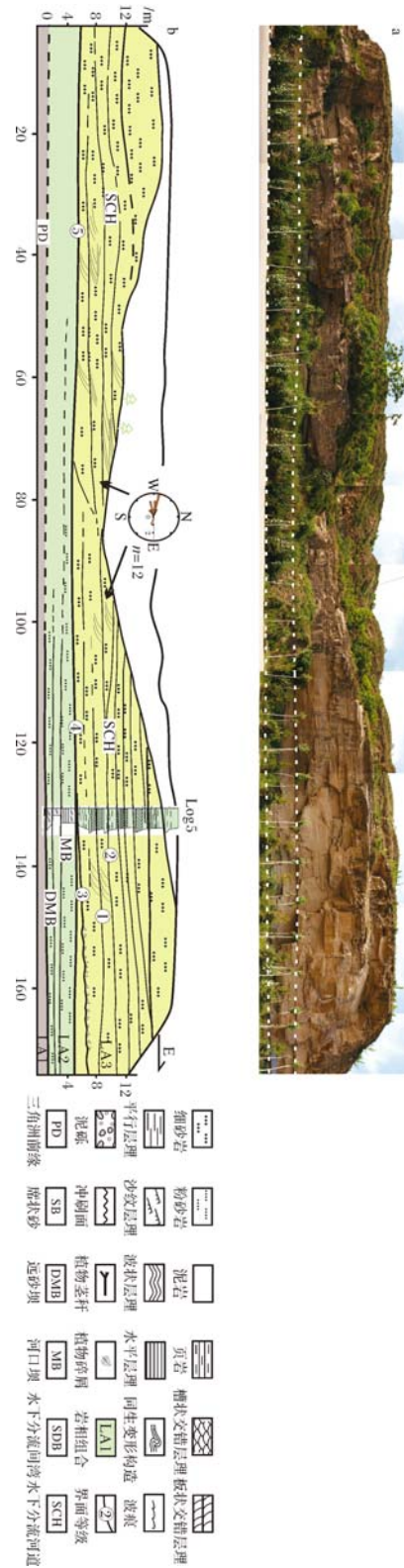


图3 裴庄剖面西段(剖面2)沉积相分析图
(a.照片镶嵌;b.内部结构解释图)

Fig.3 Sedimentary facies analysis of west part of Peizhuang section(section 2) (a. photomosaic map; b. internal architecture interpretation)



图4 垂直主剖面的辅助剖面(剖面3)照片

Fig.4 Outcrop photos of Peizhuang section along N-S orientation(section 3)

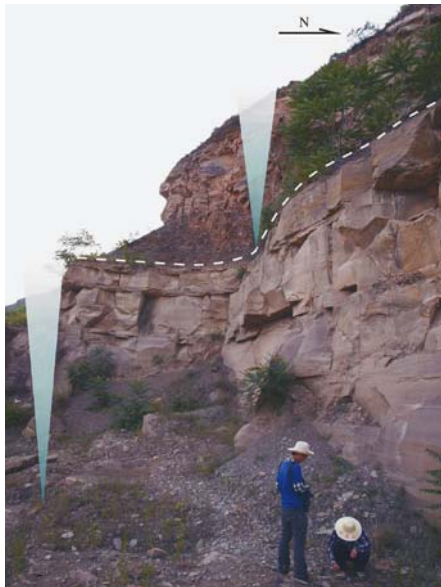


图5 垂直主剖面的辅助剖面(剖面4)照片

Fig.5 Outcrop photos of Peizhuang section along N-S orientation(section 4)

合的中上部,为灰绿色细砂岩,与其他类型的砂岩相共生,沿层面可见剥离线理构造,反映水浅、流急的上部流动机制(图7c)。

(9) 块状构造砂岩相(Sm):发育于上部岩相组合的中下部,为灰绿色细砂岩,颗粒大小较为均一,分选较好,厚度可达2~5 m,反映河床底部的快速堆积作用。

2 沉积单元

Maill A D 提出的河流沉积体系的8种基本结构单元^[1,17],已被国内外河流相研究普遍采用。而关于三角洲沉积的结构单元划分目前尚无明确的方案,本文结合结构单元和现行微相的划分,识别出6种基本

成因单元。

(1) 前三角洲(PD):位于剖面最下部,未见底,即由Mm和Mh岩相组成的LA1岩相组合。底部为灰黑色具水平层理的薄—极薄层状泥岩,局部含灰黑色页岩,发育页理构造,层面可见细小植物碎屑;上部为深灰绿色水平层理泥岩相、块状泥岩相夹粉砂质泥岩。该沉积单元出露厚度2.5~3.0 m,反映湖泊浪基面以下细粒悬浮物的缓慢垂向加积作用。

(2) 席状砂(SB):位于PD沉积单元上部,主要由灰绿色Fw和Fr岩相组成,厚度0.1~0.2 m左右,横向延伸广。对称的波纹层理和人字形波纹交错层理均指示湖泊波浪的作用特点,为浪基面以上的浅湖环境沉积,是河口砂坝沙质沉积物受波浪和岸流的淘洗、簸选和再搬运,而在三角洲前缘远端或侧缘形成的席状或带状薄层砂体。

(3) 远砂坝(DMB):位于SB沉积单元的上部,岩相组合主要由灰绿色的Fw、Fr和Fd组成,厚度0.2~0.4 m左右,横向追踪可达百米左右。远砂坝与席状砂沉积特点相似,但其厚度略大,可见火焰状构造等同生变形构造,属于河口砂坝的远端沉积。

(4) 河口坝(MB):位于DMB沉积单元的上部,东部剖面可见2个河口砂坝的侧向叠置,岩相组合以灰绿色Fd、Fr为主,可见平行层理,粒度以粗粉砂为主,厚度0.3~0.7 m,横向延伸达100~120 m左右。砂体底界面较平坦,无冲刷面,整体形态下平上凸,不具有河道沉积特点。其突出特征是发育大型的包卷层理、泄水构造等同生变形构造,反映河口部位地形不稳、快速堆积的特点。

(5) 水下分流间湾(SDB):在侧向叠加的两个河口砂坝之间以及河口坝与远砂坝之间,均夹有厚度

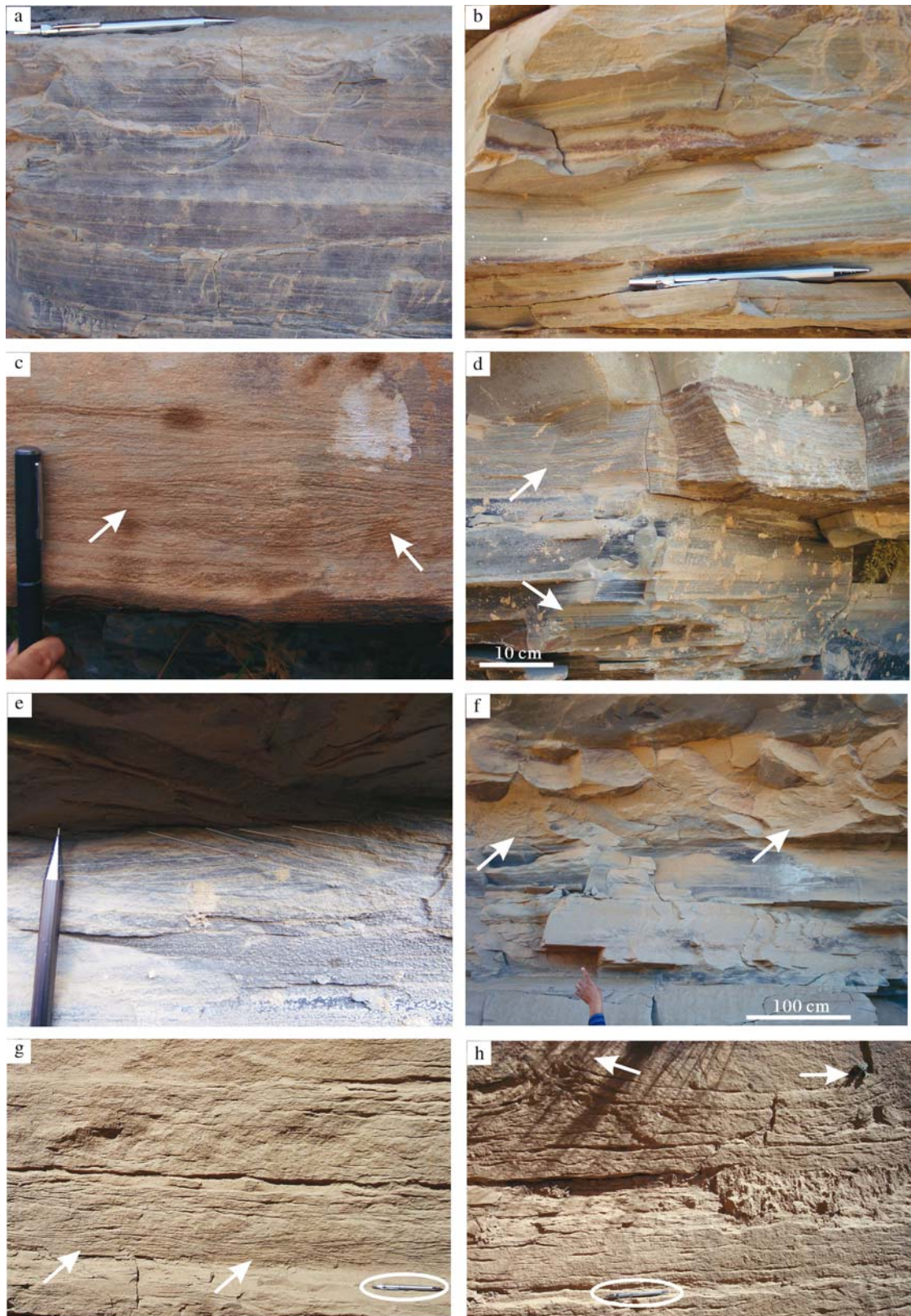


图6 发育在LA1与LA2中的典型沉积构造

a. 灰黑色泥岩中的水平层理; b. 灰绿色泥岩中的水平层理; c. 灰绿色粉砂质泥岩中的沙纹层理; d. 下部为灰绿色泥岩中的水平层理, 上部为灰绿色粉砂岩中的波状层理; e. 深灰色粉砂岩中的小型槽状交错层理; f. 灰绿色粉砂岩中的包卷层理; g. 浅灰绿色粉砂岩中的浪成沙纹层理; h. 浅灰绿色粉砂岩中的泄水构造。

Fig.6 Photos showing the typical sedimentary structures developed in LA1 and LA2

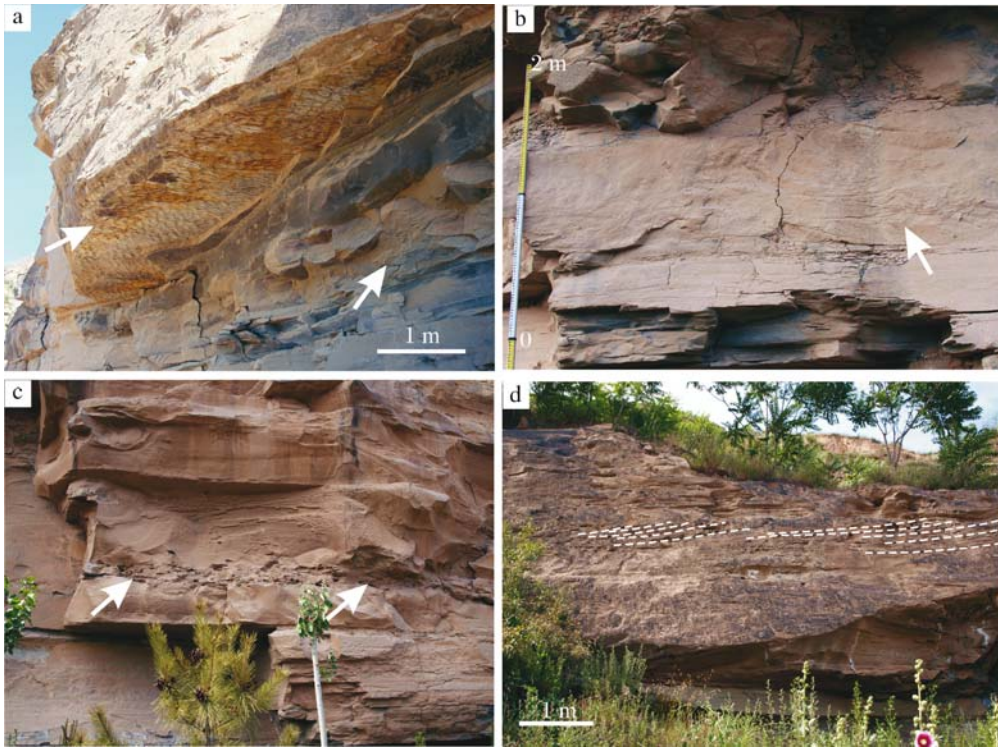


图7 发育在 LA3 中的典型沉积构造

a.灰绿色粉砂岩中的包卷层理(下部),灰绿色巨厚层状细砂岩底部的波痕构造(上部);b.灰绿色粉砂岩中的包卷层理;c.灰绿色细砂岩底部的冲刷面和泥砾沉积;d.灰绿色巨厚层状细砂岩中的大型板状交错层理。

Fig.7 Photos showing the typical sedimentary structures developed in LA3

10~15 cm 的灰绿色粉砂质泥岩,具水平层理,分布局限,推测为三角洲前缘水下分流河道间相对低洼的间湾沉积。

(6) 水下分流河道(SCH):位于 MB 沉积单元之上,即由 St、Sp、Sh、Sm 岩相组成的 LA3 岩相组合,即俗称的裴庄砂岩。该岩相组合总厚度 10~13 m,占据剖面的近一半高度,岩性以灰绿色细砂岩为主,具有多种类型的交错层理。砂体之间和砂体内部发育多级界面和大量沉积构造。砂体底界面往往具凹凸不平的冲刷面,之上保留大量的灰绿色泥砾和少量植物茎秆化石,代表河道底部的滞留沉积。砂体底部发育大量波痕构造。砂体内部有大—中型的槽状、板状交错层理和水平层理等,指示牵引流作用的沉积构造。砂体多期叠加,横向延伸 100~150 m 左右。单层砂体形态多呈中间厚、两端薄的透镜状,单层厚度具有向上变薄的趋势。薄片粒度概率曲线均为三段式,滚动组分相对较少,主要为跳跃和悬浮总体。结合其底部冲刷特征和内部沉积构造,应为典型的河道沉积。结合垂向序列和相律分析,属三角洲前缘的水下分流河道沉积。

3 界面等级划分

为进一步揭示露头内部沉积层次及构型,借鉴河流相砂体界面等级的划分方法^[1],对裴庄剖面水下分流河道复合体进行了界面等级识别与划分,由小到大可识别出 5 级界面(图 2,3)。一级界面为交错层系界面,即由一系列相同纹层组成的界面,其特点是没有明显的侵蚀作用。二级界面为层系组界面,反映了流动条件或流动方向的变化,是砂体内部不同岩相之间的分界面。在该剖面中可见槽状、板状交错层理和平行层理及其层系组成的一、二级界面,延伸距离数米至数十米,为顺流加积和侧向加积作用的结果。三级界面为大底形内的横切侵蚀面,底部具有泥砾或侧积的薄泥质夹层,界面上、下的岩相组合相似。在东侧剖面可识别出 4 个三级界面,延伸距离大于 50~100 m,指示该水下分流河道复合体存在 5 期较明显的侧向迁移和叠加事件。四级界面为多个侧积砂层叠合形成的侧积砂体的顶、底界面。由于裴庄剖面出露方向与古水流方向近于一致,在顺水流方向的剖面上,难以展示河道单元的改道和侧向迁移现象,故四

级界面在该剖面不易识别,在分流河道复合体的底部,可与分流河道复合体的底界面—五级界面重合。五级界面底部伴有分流河道底部的滞留沉积,界面上、下岩性组合不同,界面之上为中—巨厚层状砂岩相组合(LA3)构成的水下分流河道复合体,之下为薄—中层状泥岩粉砂岩相组合(LA2)构成的河口坝和水下分流间湾等细粒沉积,故为重要的岩性和物性界面。

4 相关问题讨论

4.1 垂向序列特征

由上述岩相描述和构型要素分析可知,裴庄剖面延 6 在垂向上具有明显的规律性(图 8)。由下而上,岩性由指示静水、还原环境的泥岩、页岩过渡为具有波浪作用成因的粉砂岩、发育同生变形构造的粉砂岩,之上变为巨厚层状、指示牵引流成因的的细砂岩。从沉积单元看,由前三角洲向上变为三角洲前缘的席状砂、远砂坝、河口坝和水下分流间湾沉积,之上演变为水下分流河道沉积。由下而上,三个岩相组合(LA1, LA2 和 LA3)厚度分别为 2 m(未见底)、5.5 m、12.5 m 左右。总体上,裴庄剖面为一套向上变粗、反映水体由浪基面以下的半深湖环境向浪基面以上河口部位浅湖环境的演变序列,指示河流向湖泊的进积作用,具有湖泊三角洲水下沉积的典型特征^[18]。在

位于东西向剖面中间的剖面 4 可观察到,水下分流河道沉积之上,又是一组具有由细变粗、反映由深水向浅水过渡的水下沉积序列(图 5)。富县组—延安组沉积期是中生代鄂尔多斯盆地发育鼎盛时期之一。经历富县组和延安组沉积早期的填平补齐作用,延 6 沉积期为湖盆稳定充填阶段,沉积中心即位于延安以西地区,裴庄剖面沉积为东部物源注入湖泊的产物。

近年来,关于浅水三角洲的讨论与争论不断,各种观点和认识层出不穷。鄂尔多斯盆地常被作为浅水三角洲沉积的典型代表^[8,19]。多数研究认为,典型的浅水三角洲前缘突出特征是以水下分流河道砂体为骨架,河口坝不发育,垂向相序往往不完整^[20-23]。笔者通过对裴庄剖面和该盆地大量剖面实际观察认为,在鄂尔多斯盆地延长组、延安组的沉积序列中,三角洲前缘的砂体类型并非仅有水下分流河道,而常常有河口坝、远砂坝以及席状砂等多种类型的砂体并存。笔者认为,加强对三角洲前缘内部结构的研究,对于搞清浅水三角洲沉积特征和油气储层表征均具有重要意义。

4.2 三角洲前缘结构特征

国内外大量露头 and 地震资料揭示,无论是海相还是湖泊三角洲,其前缘通常具有前积结构。根据蓄水体类型、前缘地形坡度/沉降—沉积关系等,可表现为斜交前积、S型前积、低角度叠瓦前积等多种结构类



图 8 裴庄剖面湖泊三角洲沉积垂向序列图(断面位置见图 2a, 图例见图 3)
 Fig.8 A summarized model of lacustrine deltaic sedimentary succession of Peizhuang section
 (seeing the location in Fig.2a and legend in Fig.3)

型^[24]。在顺古水流方向出露的裴庄剖面,前积结构并不明显。与此同时,在鄂尔多斯盆地的其他露头,典型的前积结构亦十分少见。笔者认为,这可能与大型坳陷型湖盆的沉积特点有关,其原始湖盆非常广阔,河流注入湖盆地形坡度小,水下分流河道推进距离长,因而在前缘表现出的前积结构不明显或前积倾角非常低缓。当然在更大尺度的地震剖面上,可能会有所反映^[25]。笔者认为,结合露头观察,开展针对性的沉积物理模拟实验,是认识三角洲前缘结构的有效途径。

5 结论

(1) 采用沉积学和构型要素分析方法,将裴庄剖面划分为9种岩相,3类岩相组合,结合相标志和砂体形态、岩相组合分析等,进一步将其解释为6种沉积单元,在水下分流河道沉积单元中识别出5级沉积界面。

(2) 通过对裴庄剖面的解剖和鄂尔多斯盆地其他典型露头的观察总结,认为该盆地中生代湖相三角洲前缘沉积并非仅有水下分流河道,常常有河口坝、远砂坝以及席状砂等多种类型的砂体并存。三角洲前缘前积结构在露头尺度表现不明显。笔者认为,加强露头研究,并开展针对性的沉积模拟实验,是解决目前浅水三角洲认识方面争议与困惑的重要途径。

参考文献 (References)

- Miall A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits, anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), southwest Colorado [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3): 233-262
- 于兴河,李胜利. 碎屑岩系油气储层沉积学的发展历程与热点问题思考[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 880-895 [Yu Xinghe, Li Shengli. The development and hotspot problems of elastic petroleum reservoir sedimentology [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 880-895]
- 吴胜和,翟瑞,李宇鹏. 地下储层构型表征:现状与展望[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 15-23 [Wu Shenghe, Zhai Rui, Li Yupeng. Sub-surface reservoir architecture characterization: current status and prospects [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 15-23]
- 李志鹏,林承焰,董波,等. 河控三角洲水下分流河道砂体内部建筑结构模式[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 101-105 [Li Zhipeng, Lin Chengyan, Dong Bo *et al.* An internal structure model of subaqueous distributary channel sands of the fluvial-dominated delta [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 101-105]
- Olariu, C, Bhattacharya J P. Terminal distributary channels and delta front architecture of fluvial dominated delta systems [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(2): 212-233
- Brian R T, Gillian N T. The Table Rocks sandstone: a fluvial, friction-dominated lobate mouth bar sandbody in the Westphalian B coal measures, NE England [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 190(1/2/3/4): 97-119
- 张昌民,尹太举,朱永进,等. 浅水三角洲沉积模式[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 933-944 [Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, *et al.* Shallow water deltas and their sedimentary models [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 933-944]
- 朱永进,尹太举,刘玲利. 浅水型三角洲沉积研究进展及问题讨论[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(3): 22-26 [Zhu Yongjin, Yin Taiju, Liu Lingli. Progress and discussion on shallow-water delta sediment [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(3): 22-26]
- 朱筱敏,刘媛,方庆,等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式——以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 89-99 [Zhu Xiaomin, Liu Yuan, Fang Qing, *et al.* Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake, example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao sag, Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 89-99]
- 焦养泉,李思田,杨士恭. 三角洲—湖泊沉积体系及聚煤研究——以鄂尔多斯盆地神木地区延安组II单元为例[J]. *地球科学*, 1992, 17(2): 113-120 [Jiao Yangquan, Li Sitian, Yang Shigong. Delta-lacustrine depositional system and coal accumulation research [J]. *Earth Science*, 1992, 17(2): 113-120]
- 焦养泉,李思田,李祯,等. 曲流河与湖泊三角洲沉积体系及典型骨架砂体内部构成分析[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1995: 1-32 [Jiao Yangquan, Li Sitian, Li Zhen, *et al.* Meandering River, Delta Systems and Architectures of Typical Framework Sandstones [M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1995: 1-32]
- 付清平,李思田. 湖泊三角洲平原砂体的露头构形分析[J]. *岩相古地理*, 1994, 14(5): 21-33 [Fu Qingping, Li Sitian. Outcrop analysis of architecture of lacustrine deltaic plain sandbodies [J]. *Journal of Palaeogeography*, 1994, 14(5): 21-33]
- 王振奇,何贞铭,张昌民,等. 三角洲前缘露头储层层次分析——以鄂尔多斯盆地东缘谭家河剖面为例[J]. *江汉石油学院学报*, 2004, 26(3): 32-35 [Wang Zhenqi, He Zhenming, Zhang Changmin, *et al.* Analysis on reservoir hierarchy of deltaic front outcrops—Taking Tanjiahe outcrop in eastern Ordos Basin for example [J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2004, 26(3): 32-35]
- 陈飞,罗平,张兴阳,等. 鄂尔多斯盆地东缘上三叠统延长组砂体结构与层序地层学研究[J]. *地学前缘*, 2010, 17(1): 1-7 [Chen Fei, Luo Ping, Zhang Xingyang, *et al.* Stratigraphic architecture and sequence stratigraphy of Upper Triassic Yanchang Formation in the eastern margin of Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 1-7]
- 张兴阳,罗平,顾家裕,等. 三级基准面旋回内三角洲砂体骨架模型的建立——以陕北安塞三角洲露头为例[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 540-548 [Zhang Xingyang, Luo Ping, Gu Jiayu, *et al.* Establishment of the delta sandbody framework model in a 3rd order base level cycle: Taking Ansai delta outcrop as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 540-548]

- 16 Zou Caineng, Zhang Xingyang, Luo Ping, *et al.* Shallow-lacustrine sand-rich deltaic depositional cycles and sequence stratigraphy of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin China [J]. *Basin Research*, 2010, 22(1): 108-125
- 17 Miall A D. Architectural element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 1985, 22(4): 261-308
- 18 Elliott T. Deltas [M]//Reading H G. *Sedimentary Environments and Facies*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1986: 113-154
- 19 韩永林, 王成玉, 王海红, 等. 姬堰地区长8油层组浅水三角洲沉积特征[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1057-1064 [Han Yonglin, Wang Chengyu, Wang Haihong, *et al.* Sedimentary characteristics of shallow-water deltas in Chang-8 subsection of Yanchang Formation, Jiyuan area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1057-1064]
- 20 梅志超, 林晋炎. 湖泊三角洲的地层模式和骨架砂体的特征[J]. *沉积学报*, 1991, 9(4): 1-11 [Mei Zhichao, Lin Jinyan. Stratigraphic pattern and character of skeletal sandbodies in lacustrine deltas[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1991, 9(4): 1-11]
- 21 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. *沉积学报*, 2008, 26(4): 575-582 [Zhu Weilin, Li Jianping, Zhou Xinhui, *et al.* Neogene shallow-water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 575-582]
- 22 胡明毅, 马艳荣, 刘仙晴, 等. 大型拗陷型湖盆浅水三角洲沉积特征及沉积相模式——以松辽盆地茂兴—敖南地区泉四段为例[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(3): 13-17 [Hu Mingyi, Ma Yanrong, Liu Xianqing, *et al.* Sedimentary characteristics and mode of shallow delta in large scale downwrap lacustrine Basin- taking Quan-4 Formation in Maoxing and Aonan region in Songliao basin for example [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(3): 13-17]
- 23 吕晓光, 李长山, 蔡希源, 等. 松辽大型浅水湖盆三角洲沉积特征及前缘相储层结构模型[J]. *沉积学报*, 1999, 17(4): 572-577 [Lü Xiaoguang, Li Changshan, Cai Xiyuan, *et al.* Depositional characteristics and front facies reservoir framework model in Songliao shallow lacustrine delta [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(4): 572-577]
- 24 Berg O R. Seismic detection and evaluation of delta and turbidite sequence: their application to the exploration for the subtle trap [J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(9): 57-75
- 25 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流拗陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. *地质学报*, 2008, 82(6): 813-825 [Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, *et al.* Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 813-825]

Outcrop-based Anatomy of a Lacustrine Delta Succession: A case study from Peizhuang Section, Ordos Basin

ZHAO Jun-feng¹ QU Hong-jun¹ LIN Jin-yan¹ LIU Xiang² YANG Yang¹ LIN Chuan¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics / Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069;

2. Huabei Oilfield Company, Petroleum China, Renqiu, Hebei 062552)

Abstract: With the further exploration and production of hydrocarbon resources, objective and detailed anatomy for internal architecture of reservoir bodies is becoming the necessary approach to improve the efficiency of development. Outcrop based sedimentary section plays an irreplaceable role in building geological model of underground reservoir. Taking the Yan'an Formation developed in Yan'an area of the Ordos Basin as an example, the internal architecture of a subaqueous sedimentary succession in lacustrine deltaic environment was anatomized, employing the research thoughts of sedimentology and architecture elements. According to this study, 9 lithotypes, 3 kinds of litho associations are identified in Peizhuang section. Furthermore, 6 kinds of sedimentary architecture elements such as prodelta, sheet sandstone, distal sandstone, mouth bar, subaqueous distributary channel, subaqueous distributary bay are identified as a result. Five hierarchy bounding surfaces are also recognized in the subaqueous distributary channel succession. It's suggested that not only subaqueous distributary channel, but also mouth bar, distal bar, sheet bar and so on are developed in delta front of so-called shallow-water delta. Generally, there is an upward coarsening succession in the studied section, while the progressive architecture of delta front is difficult to be recognized in outcrop scale. In consideration of the controversy about shallow-water delta, we suggest that enhancing outcrop-based study and particular physical modeling should be the key solutions.

Key words: outcrop; lithofacies type; sedimentary architecture; bounding surface hierarchy; shallow-water delta; Yan'an Formation; Ordos Basin